

基于数值模拟的采空区“三带”划分及通风优化策略研究

朱 简

中煤科工集团重庆研究院有限公司 重庆 400037

摘 要: 本文聚焦基于数值模拟的采空区“三带”划分及通风优化策略。先阐述“三带”划分理论基础,介绍划分方法。接着说明数值模拟模型建立,涵盖几何、数学模型构建与参数设置。然后分析“三带”划分结果,包括流场、温度场、浓度场特征及最终划分情况。最后分析采空区通风现状,制定优化目标与策略,旨在降低自燃风险,提升通风系统安全性与高效性。

关键词: 数值模拟;采空区;三带划分;通风优化策略

引言:在煤矿开采中,采空区遗煤自燃是严重威胁安全生产的问题,科学划分采空区“三带”并优化通风系统是防控自燃的关键。传统方法在“三带”划分和通风优化上存在局限,而数值模拟技术凭借其高效、精准等优势,为解决这些问题提供了新途径。本文聚焦基于数值模拟的采空区“三带”划分及通风优化策略,旨在为采空区安全开采提供有力支持。

1 采空区“三带”划分理论基础

采空区“三带”划分理论是防控遗煤自燃的核心,它依据采空区内氧气浓度、温度和遗煤氧化状态差异,将采空区分为散热带、氧化带和窒息带。散热带紧邻工作面,宽数米至十余米,通风影响大,氧气浓度与工作面相近,遗煤虽与空气接触,但散热良好,仅缓慢氧化,无自燃风险。氧化带在散热带后方,漏风强度适中,氧气浓度5%-18%,漏风供氧与遗煤氧化放热平衡且放热占优,温度升高,产生一氧化碳等气体,是自燃高发区。窒息带在采空区最深处,漏风停滞,氧气浓度低于5%,遗煤氧化因缺氧终止,温度稳定,无自燃风险。“三带”界限受地质、开采参数、通风系统及矽石物理性质影响^[1]。当前划分方法有现场实测、实验室模拟和数值模拟,各有优劣,实际应用中需结合多种方法互补验证,以提升划分准确性。

2 采空区数值模拟模型建立

2.1 几何模型构建

几何模型构建是采空区数值模拟的基础,要以现场地质资料和开采方案为依据,保证模型与实际采空区形态相符。先收集煤层底板等高线图等资料,明确煤层参数及顶底板岩性,确定模型边界。为平衡模拟精度与计算效率,模型范围通常涵盖工作面、采空区及周边岩

体,走向取推进长度2-3倍,倾向取工作面长加两侧煤柱宽,垂向取煤层顶板以上50m至底板以下30m,避免边界条件干扰。采用网格划分技术离散模型,采空区及工作面附近加密网格,尺寸 0.5m^3 ;远离采空区的顶底板岩体用稀疏网格,尺寸 2m^3 ,经网格无关性验证确保合理性。按采空区垮落规律设置垮落矽石区,依压实程度划分,还原物理形态。模型构建后进行几何检查,修正重叠与畸形网格,保证质量达标。

2.2 数学模型选择

采空区数值模拟要依研究目的选合适数学模型,核心有渗流、传热和反应动力学模型,三者耦合可综合模拟采空区流场、温度场及浓度场。渗流模型以达西定律为基础,将垮落矽石视为多孔介质,描述空气流动速度与压力分布,需考虑矽石参数随深度变化。传热模型结合傅里叶定律与能量守恒方程,模拟温度分布及变化,考虑遗煤氧化放热等三种传热方式,遗煤氧化放热量作内热源。反应动力学模型用阿伦尼乌斯方程描述遗煤氧化,反映氧气消耗等速率与温度关系,量化氧化程度。为提高准确性,采用多场耦合算法,实现渗流场、温度场、浓度场相互作用,即空气流动影响后两者,温度变化影响渗流场,浓度变化为温度场提供数据。

2.3 模型参数设置

模型参数设置对数值模拟结果准确性至关重要,需综合现场实测、实验室试验及相关文献确定,涵盖岩体物理力学、渗流、热物理及反应动力学参数。岩体物理力学参数方面,不同岩性如煤、顶板砂岩、底板泥岩的密度、弹性模量、泊松比不同,煤密度取 $1300 - 1500\text{kg}/\text{m}^3$,顶板砂岩密度取 $2500 - 2700\text{kg}/\text{m}^3$,通过现场岩芯取样试验获取。渗流参数中,采空区垮落矽石孔隙率依

垮落程度设定,新鲜垮落区为 0.4 - 0.5,压实区为 0.2 - 0.3,渗透率与孔隙率正相关,由室内渗透试验测定。热物理参数里,煤的比热容取 1000 - 1200J/(kg·K),导热系数取 0.2 - 0.3W/(m·K),顶板岩体参数参考行业规范并结合实验室测试校准。反应动力学参数通过程序升温试验测定,指前因子为 $10^5 - 10^7s^{-1}$,活化能为 40 - 60kJ/mol,反应级数取 1 级。参数设置完成后,开展敏感性分析,确定关键参数并重点校准,以提升模型可靠性^[2]。

3 基于数值模拟的采空区“三带”划分结果分析

3.1 采空区流场分布特征

采空区流场分布受漏风通道形态、孔隙率分布及通风系统影响,呈现明显的分区特征。模拟结果显示,空气从工作面通过煤壁裂隙及采空区垮落矸石空隙进入采空区,形成漏风气流,漏风速度在采空区不同区域差异显著。靠近工作面的散热带内,由于垮落矸石空隙率高且与工作面直接连通,漏风速度较大,最大值可达0.1-0.3m/s,气流流动路径较为清晰,主要沿采空区倾向方向延伸。进入氧化带后,随着采空区深度增加,矸石压实程度提高,孔隙率降低,漏风通道逐渐变窄,漏风速度逐渐减小至0.01-0.1m/s,气流流动方向变得复杂,出现多股分支气流,部分区域因矸石堆积不均形成涡流,导致空气停留时间延长。在窒息带内,矸石被充分压实,孔隙率极低,漏风速度小于0.01m/s,气流基本处于停滞状态,仅存在微弱的分子扩散运动。流场分布还呈现明显的对称性,以工作面推进方向为轴线,两侧流场分布基本对称;在采空区顶部因顶板垮落形成的较大空隙区域,漏风速度相对较大,成为主要漏风通道,该区域氧化带范围也相应扩大,流场分布特征为“三带”划分提供了重要依据,漏风速度突变位置往往对应“三带”界限。

3.2 采空区温度场分布特征

采空区温度场分布与遗煤氧化放热、空气对流换热及岩体导热密切相关,呈现从工作面到采空区深部逐渐变化的规律。模拟结果表明,散热带内温度分布较为均匀,基本维持在20-25℃的环境温度,该区域空气流动速度快,遗煤氧化产生的少量热量被快速带走,无法形成热量积累,温度无明显升高趋势,仅在靠近氧化带的边界处出现轻微升温,升温幅度不超过5℃。进入氧化带后,随着漏风速度降低,空气停留时间延长,遗煤氧化放热速率大于散热速率,温度开始持续升高,形成明显的升温梯度,升温速率为0.5-2℃/m,在氧化带中后部达到最高温度,最高温度可达70-100℃,具体数值取决于遗煤自燃倾向性及漏风强度。氧化带与窒息带交界处,温度达到峰值后开始逐渐下降,进入窒息带后,由于氧

气浓度过低,遗煤氧化反应基本停止,无新热量产生,原有热量通过岩体导热向周围扩散,温度逐渐降低至30-40℃的稳定状态,降温梯度相对平缓,为0.2-0.5℃/m。温度场分布还存在局部异常区域,在采空区垮落不均形成的大空隙区域,因漏风集中导致氧化放热增强,出现局部高温点,该区域成为遗煤自燃的重点防控区域^[3]。

3.3 采空区浓度场分布特征

采空区浓度场主要包括氧气浓度、一氧化碳浓度分布,其变化规律直接反映遗煤氧化进程,是“三带”划分的核心指标。模拟结果显示,氧气浓度从工作面向采空区深部逐渐降低,呈现明显的分区特征。散热带内由于漏风充分,氧气浓度与工作面风量中的氧气浓度基本一致,维持在20%左右,仅因遗煤轻微氧化略有降低,降低幅度不超过1%,该区域一氧化碳浓度极低,基本低于5ppm,处于检测下限附近。进入氧化带后,随着遗煤氧化反应加剧,氧气被大量消耗,浓度快速降低,从20%降至5%,降低速率逐渐减缓,同时一氧化碳浓度开始快速升高,在氧化带前部浓度迅速突破50ppm,中部达到峰值,峰值浓度可达500-1000ppm,峰值位置与温度峰值位置基本一致,表明该区域氧化反应最为剧烈。氧化带与窒息带交界处,氧气浓度降至5%以下,进入窒息带后,氧气浓度继续缓慢降低至1%以下,甚至趋近于零,遗煤氧化反应停止,一氧化碳浓度从峰值快速下降,在窒息带中部降至10ppm以下,随后维持稳定。浓度场分布受漏风通道影响显著,在主要漏风通道区域,氧气浓度降低缓慢,氧化带范围向深部延伸,一氧化碳浓度峰值也相应后移,浓度场分布特征与流场、温度场分布相互印证,共同反映“三带”分布规律。

3.4 “三带”划分结果

结合采空区流场、温度场、浓度场模拟结果,依据“三带”划分指标进行综合判定,确定“三带”界限及范围。散热带划分以氧气浓度高于18%、温度基本维持环境温度、漏风速度大于0.1m/s为判定标准,划分结果显示,散热带位于采空区靠近工作面一侧,走向方向宽度为8-12m,倾向方向沿工作面全长分布,该区域内空气流动充分,遗煤氧化程度低,无自燃风险。氧化带以氧气浓度5%-18%、温度持续升高且存在明显高温点、漏风速度0.01-0.1m/s、一氧化碳浓度高于50ppm为判定标准,其范围位于散热带后方,走向方向宽度为30-40m,倾向方向在工作面中部区域宽度较大,两侧因煤柱阻隔略有变窄,该区域内漏风强度适中,遗煤氧化放热明显,存在显著自燃风险,高温点主要分布在氧化带中后部,最高温度达85℃,一氧化碳浓度峰值为800ppm,需重点

监控。窒息带以氧气浓度低于5%、温度从峰值逐渐降至稳定状态、漏风速度小于0.01m/s、一氧化碳浓度低于10ppm为判定标准，位于采空区最深处，走向方向从氧化带后部延伸至采空区边界，该区域氧气匮乏，遗煤氧化反应停止，无自燃风险。“三带”划分结果还显示，采空区顶部大空隙区域氧化带宽度较其他区域增加5-8m，需在该区域加强防灭火措施。

4 采空区通风现状分析及优化策略制定

4.1 采空区通风现状分析

经现场风量测定、通风阻力测试及采空区漏风检测，全面分析当前采空区通风系统。风量测定显示，工作面实际进风量800m³/min满足生产需求，但分配不均，进风巷侧风量集中、风速1.5m/s，回风巷侧风量小、风速0.8m/s，致温度分布不均。通风阻力测试表明，总阻力1500Pa，采空区周边煤柱及巷道拐弯处阻力大，占40%，风机效率仅75%。采空区漏风检测采用示踪气体法，总漏风量120m³/min，漏风率15%，集中在煤壁裂隙等处，煤壁裂隙漏风占60%。漏风使氧化带延伸、温度升高、一氧化碳浓度超标。且U型通风方式回风巷侧漏风严重，采空区后部窒息带缩小，系统稳定性不足，推进速度减慢时易引发遗煤自燃。

4.2 通风优化目标

结合现状与“三带”划分结果制定优化目标，以解决风量分配不均、漏风率高、自燃风险大等问题，实现安全高效通风。首要目标是降低漏风率，总漏风量控制在80m³/min内，漏风率降至10%以下，减少特定部位漏风，使氧化带范围、温度及一氧化碳浓度恢复正常，消除自燃隐患。其次，优化风量分配，使工作面风速均匀分布，温度整体控制在25℃以下。同时，降低总阻力至1200Pa以下，提高风机效率至85%以上，降低成本。提高系统稳定性，确保工况变化时通风参数稳定^[4]。最后，建

立监测预警体系，实时监测参数，超预警值及时报警，为调整提供依据。

4.3 通风优化策略制定

基于优化目标与现场条件制定策略。通风方式上，U型通风改Y型通风，增设尾巷形成“一进两回”系统，降低漏风量，使风量分配均匀，模拟显示漏风率可降40%。漏风治理采取“堵疏结合”，对煤壁裂隙用高分子材料注浆封堵，对顶板垮落区域喷洒堵漏剂。风量调节通过调整通风机叶片角度及风门开度，合理分配各巷道风量，设置导流板降低局部阻力，使总阻力降至1100Pa。完善监测预警系统，在采空区氧化带增设传感器，在工作面及巷道设风速传感器，数据实时传输，超限自动报警并启动尾巷抽采风机，增强惰性气体注入，抑制遗煤氧化。

结束语

本文借助数值模拟对采空区“三带”划分及通风优化展开研究，明确了“三带”分布特征与通风现状问题，制定了针对性优化策略。通过优化通风方式、治理漏风、调节风量和完善监测预警等措施，有望降低自燃风险，提升通风系统性能。后续需持续实践验证与完善，为采空区安全开采提供更有力的技术支持与保障。

参考文献

- [1]杨毅凡.基于数值模拟的边坡稳定性分析与优化设计研究[J].工程建设与设计,2023(18):32-34.
- [2]王庆超,冉广,方波.深部复杂矿井通风系统优化数值模拟研究[J].内蒙古煤炭经济,2024,(21):79-81.
- [3]张平.基于通风改善指标的矿井通风系统优化设计研究[J].能源技术与管理,2025,50(02):27-29+71.
- [4]李晓威.局部通风机智能化监控系统的应用[J].机械管理开发, 2021, 36(9): 244-245.